: https://dx.doi.org/10.22067/jgrd.2022.72197.1065
مقالهٔ پژوهشی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال بیستم، شمارهٔ ۱، بهار۱٤۰۱، شمارهٔ پیاپی ۳۸

بررسی تغییرات تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم

راضیه خیری (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی،گروه جغرافیا، دانشگاه رازی،کرمانشاه،ایران)
raziye.khairy@yahoo.com
فیروز مجرد (دانشیار اقلیم‌شناسی،گروه جغرافیا، دانشگاه رازی،کرمانشاه،ایران، نویسندهٔ مسئول)
f_mojarrad@yahoo.com
بهمن فرهادی (استادیار آبیاری و زهکشی،گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی،کرمانشاه،ایران)
bfarhadi2001@yahoo.com
جعفر معصوم‌پور سماکوش (دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی،کرمانشاه،ایران)
j_masompour27@yahoo.com

صص ۲٤۸ ـ ۲۱۵

چکیده

با توجه به محدودیت‌های دسترسی به منابع آب در ایران و به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، آگاهی از میزان تبخیر و تعرق گیاهان تحت‌تأثیر تغییر اقلیم بسیار اهمیت دارد. هدف این مطالعه، بررسی تغییرات تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم به‌منظور انجام برنامه‌ریزی‌های سازگار با شرایط اقلیمی آینده بود. به این منظور، با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو CCSM4 و با توجه به طول دورهٔ رشد و ضریب رشد گیاهی محصول گندم آبی، مقادیر تبخیر و تعرق محصول در دورهٔ پایه ۲۰۰۵-۲۰۲۰ و دو دورهٔ آینده (۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۰٦۱-۲۱۰۰) در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برآورد، نقشه‌های مربوطه تهیه و الگوهای فضایی پدیده بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد، تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه در ایران در دورهٔ آینده در مقایسه با دورهٔ

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۱/۱۰ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۰٤/۰۷

پایه حدود ٦ درصد افزایش خواهد یافت که این افزایش در آیندهٔ دور (۲۰٦۱–۲۱۰۰) بیشتر از آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰٦۰) و در ماه‌های مختلف دورهٔ کشت در سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 خواهد بود. بیشترین مقدار ماهانهٔ تبخیر و تعرق در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به ماه مه به‌ترتیب به‌میزان ۱۵۳ و ۱٦۲ میلی‌متر است. ماه‌های اُکتبر و نوامبر که ماه‌های آغازین دورهٔ کشت هستند نیز کمترین میزان افزایش تبخیر و تعرق را در آینده به میزان تقریبی ۱٤ میلی‌متر خواهند داشت. مقدار تبخیر و تعرق گندم آبی در دورهٔ رشد در سطح کشور از ۳۳۰ تا ۹۷۱ میلی‌متر در دورهٔ پایه تا ۳٤۰ تا ۱۰۲۵ میلی‌متر در آیندهٔ دور در سناریوی RCP8.5 متفاوت است. افزایش تبخیر و تعرق در آینده بسیاری از برنامه-ریزی‌ها را در زمینهٔ تأمین آب محصول گندم در کشور به چالش خواهد کشید؛ ازاین‌رو لزوم توجه به نیاز آبی در سال‌های آینده به‌خصوص در ماه‌های آوریل و مه که اوج فعالیت و رشد گیاه و زمان حداکثر نیاز آبی است، ضروری است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق، گندم آبی پاییزه، ایران، ضریب رشد گیاهی، مدل گردش عمومی CCSM4.

۱. مقدمه

تغییر آب‌وهوا به‌عنوان یکی از خطرهای جدی که توسعهٔ پایدار را در ابعاد مختلف زیست‌محیطی، سلامت انسان، امنیت غذایی، فعالیت‌های اقتصادی، منابع طبیعی و ساختارهای زیربنایی تهدید می‌کند، مدنظر کشورها و سازمان‌های مختلف قرار گرفته است. اثرات تغییرات آب‌وهوایی بر تولید محصول و تولید غذا موجب نگرانی در سراسر جهان شده است. امروزه کشاورزی بیشتر از هر زمان دیگری به‌دلیل افزایش جمعیت و به تبعیت از آن افزایش تقاضا برای تولیدات کشاورزی به تغییر شرایط آب‌وهوایی آسیب‌پذیر است و این موضوع لزوم مطالعهٔ بیشترِ تأثیرپذیری بخش کشاورزی را از تغییرات آب‌وهوایی در آینده نشان می‌دهد.

تولیدات کشاورزی نه‌تنها به‌دلیل تأثیر مستقیم تغییرات دما و بارش، بلکه به‌دلیل تغییرات در فرایندهای هیدرولوژیک یعنی دسترسی به منابع آب و تقاضا برای آب آبیاری، در برابر تغییرات آب‌وهوایی حساس‌اند. آبیاری نقش مهمی در استفاده از منابع آب و توزیع زمین‌های

کشاورزی دارد. آب استفاده‌شده برای آبیاری کشاورزی ۸۰ درصد از کل مصرف آب در جهان را در برمی‌گیرد (ژانگ، وانگ و نیو[1]، ۲۰۱۷، ص. ۵۱۹). در ایران این رقم به ۹٤ درصد می‌رسد (صداقت، ۱۳۹۰، ص. ۸۹). آب یکی از مهم‌ترین عوامل رشد و توسعهٔ کشورهاست. کمبود آب آشامیدنی از یک سو و نیاز روزافزون به غذا از سوی دیگر، منابع آب موجود را با بحران جدی مواجه کرده است. خاورمیانه ازجمله مناطقی است که به‌شدت با مشکل محدودیت منابع آب شیرین روبه‌روست؛ به‌طوری‌که بسیاری از کارشناسان پیش‌بینی می‌کنند، در آینده درگیری‌های فراوانی بر سرِ تصاحب منابع آب شیرین منطقه صورت خواهد گرفت. ایران نیز از یک طرف به‌دلیل کم بودن ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی، در زمرهٔ کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و از طرف دیگر، به‌دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعهٔ بخش‌های اقتصادی، روز به روز با افزایش تقاضای آب مواجه است (مجیدی، علیزاده و قربانی، ۱۳۹۰، ص. ۷۷٦).

تغییرات آب‌وهوایی ناشی از تغییر اقلیم در کنار سایر اثرهای خود، بر بارندگی و چرخه‌های هیدرولوژیک اثر خواهد گذاشت و این تأثیرات بر تولیدات کشاورزی که به‌طور مستقیم به محیط فیزیکی وابسته است، بیشتر خواهد بود. کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کنندهٔ عمدهٔ آب، نیاز خواهد داشت تا به‌منظور حصول پایداری، در کنار سایر چالش‌ها، با این تغییرات تطابق پیدا کند و پیش‌آگاهی دربارهٔ تغییرات آتی اقلیمی و تأثیر آن بر مصرف آب کشاورزی می‌تواند در این زمینه راه‌گشا باشد (رحمانی، جامی‌الاحمدی، شهیدی و هادی‌زاده ازغندی، ۱۳۹٤، ص. ٤٤۳). شرایط خاص اقلیمی ایران که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی است، واقعیتی انکارناپذیر آن است؛ زیرا هرگونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفادهٔ صحیح و منطقی از منابع محدود آب کشور کرده است (سپه‌وند، ۱۳۸۸، ص. ٦٤). در بین محصولات کشاورزی، گندم یکی از محصولات استراتژیک در ایران و جهان است و نقش بسیار اساسی در تغذیهٔ انسان دارد. گندم در بیشتر مناطق کشور به‌صورت دیم قابلیت کشت دارد و سازگاری اقلیمی و محیطی بسیار زیادی دارد؛ این در حالی است که با توجه به قرارگرفتن ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و همچنین وقوع خشکسالی و تغییر

1. Zhang, Wang & Niu

اقلیم، مسئلهٔ کمبود منابع آب بیش از گذشته مطرح است و کمبود منابع آب در بخش‌های مختلف و به‌ویژه کشاورزی، تولید محصولات استراتژیک و مهم ازجمله گندم را با مشکلات اساسی روبه‌رو خواهد کرد.

بنابراین در چنین شرایطی مدیریت منابع محدود آبی و بهره‌وری بهینه از آن‌ها بسیار اهمیت دارد. یکی از راه‌حل‌های این مسئله، مطالعه و شناخت تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات مهم کشاورزی است که زمینه را برای برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف منابع آبی فراهم می‌کند؛ ازاین‌رو هدف این تحقیق، بررسی تغییرات تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم به‌منظور انجام برنامه‌ریزی‌های سازگار با شرایط اقلیمی آینده است.

۲. پیشینهٔ تحقیق

در زمینهٔ تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات، مطالعات موردی زیادی در شرایط اقلیمی کنونی و آینده انجام شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. نتایج این مطالعات می‌تواند در توسعه و پیشرفت سیستم‌های کشاورزی مقاوم در برابر تنش‌های ناشی از تغییر آب‌وهوا سودمند باشد. موضوع اصلی که در این زمینه مدنظر است، تقاضای آب آبیاری کشاورزی و استفاده از منابع آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم است. در همین راستا، شهید[1] (۲۰۱۱، ص. ٤۳۳)، با مطالعهٔ اثر تغییر اقلیم بر تقاضای آب آبیاری در شمال غرب بنگلادش بیان کرد که تغییر اقلیم، تغییر درخور ملاحظه‌ای را در کل نیاز آبیاری ایجاد نخواهد کرد؛ بااین‌حال، افزایش استفادهٔ روزانه از آب برای آبیاری همچنان وجود خواهد داشت؛ درحالی‌که فارس، آوال، فارس، جانسون و والنزوئلا[2] (۲۰۱٦، ص. ٤۹) بیان کردند، افزایش دما به افزایش تبخیر و تعرق و درنتیجه افزایش نیاز آب آبیاری[3] برای دو محصول ذرت دانه‌ای و قهوه منجر می‌شود.

1. Shahid
2. Fares, Awal, Fares, Johnson & Valenzuela
3. Irrigation Water Requirement (IRR)

برآورد نیاز به آب، پایهٔ بسیاری از مطالعات کشاورزی است؛ ازجمله دیو، میشرا، سینگ، میشرا و سینگ[۱] (۲۰۱۷، ص. ۳۳۸) برای محاسبهٔ نیاز آبی محصول گندم در مراحل مختلف رشد، از مدل کراپ‌وات استفاده کردند. همچنین تخمین وضعیت آینده جایگاه مهمی در مطالعات تغییر اقلیم دارد. زینگ، وانگ، شاو و دینگ[۲] (۲۰۱۸، ص. ۱) با مطالعهٔ تغییرات روزهای دورهٔ رشد[۳]، بارش مؤثر[٤] و تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه[٥]، نیاز خالص آبیاری[٦] گندم زمستانه را در چین تحت سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) برآورد کردند و نشان دادند، نیاز خالص آبیاری در مقایسه با دورهٔ پایه، تحت سه سناریو تا سال ۲۰۸۰ کاهش خواهد یافت. سُریادی، رسواندی، دویراتنا و پراویرانگارا[۷] (۲۰۱۹، ص. ۱۳٦٤)، در بررسی نیاز آبی کشت ذرت در ترکیب با برنج و سویا با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات به این نتیجه دست یافتند که با توجه به بهره‌وری و مقدار نیاز آبی محصول، بهترین ترکیب کشت، ترکیب ذرت با سویا است.

همانند مطالعات خارجی، در داخل کشور نیز هدف اصلی از مطالعهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل، برآورد نیاز آبی محصولات بوده است. به همین منظور مجرد، قمرنیا و نصیری (۱۳۸٤، ص. ۵۹) در برآورد بارش مؤثر و نیاز آبی برای کشت برنج در جلگهٔ مازندران نشان دادند، نیاز آب مصرفی و نیاز خالص آبیاری در شرق جلگهٔ مازندران بیشتر از غرب آن است؛ درحالی‌که مقدار بارش مؤثر در غرب جلگه بیشتر است. بارش مؤثر سهم بیشتری از نیاز آب مصرفی را در غرب جلگه تأمین می‌کند؛ حال آنکه این سهم در شرق کمتر است. سلیمانی نادگانی، پارسی‌نژاد، عراقی‌نژاد و مساح‌بوانی (۱۳۹۰، ص. ۳۸۹) نیز در مطالعهٔ تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد گندم دیم در بهشهر نشان دادند، با توجه به تغییراتی که در دما و فصل بارش اتفاق خواهد افتاد، نیاز خالص آبیاری با جابه‌جایی تاریخ کاشت به‌سمت فصل زمستان افزایش خواهد یافت که این افزایش در دوره‌های آتی تحت‌تأثیر تغییر اقلیم

1. Deo, Mishra, Singh, Mishra & Singh
2. Xing, Wang, Shao & Ding
3. Days of the Growing Period (DGP)
4. Effective Precipitation (EP)
5. Crop-Specific Potential Evapotranspiration (ETc)
6. Net Irrigation Requirements (NIR)
7. Suryadi, Ruswandi, Dwiratna & Prawiranegara

تشدید خواهد شد. در اثر این تغییر، به‌ازای یک تاریخ کاشت مشخص، کمبود عملکرد نسبی محصول در دوره‌های آینده در مقایسه با دورهٔ پایه تغییر چشمگیری نخواهد داشت، اما با جابه‌جایی تاریخ کاشت به‌سمت فصل زمستان به‌دلیل افزایش تبخیر و تعرق و استفادهٔ کمتر از باران مؤثر، عملکرد نسبی افزایش خواهد یافت. هم‌راستا با مطالعات مذکور، میرموسوی، پناهی، اکبری و اکبرزاده (۱۳۹۱، ص. ٤٥) واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET0) و محاسبهٔ نیاز آبی گیاه (ETC) زیتون را در استان کرمانشاه بررسی کردند و نشان دادند، روش پنمن–مانتیث فائو، برآورد دقیق‌تری را از تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع ارائه می‌کند. عینی نرگسه، دیهیم‌فرد، صوفی‌زاده، حقیقت و نوری (۱۳۹٤، ص. ۲۰٤) در مطالعهٔ خود به این نتیجه رسیدند که تحت شرایط تغییر اقلیم در استان فارس، عملکرد دانهٔ گندم در شرایط پتانسیل، روند افزایشی از ۱۲ تا ۲٤ درصد را خواهد داشت. این افزایش عملکرد، برآیند دو عامل افزایش دما و دی‌اکسیدکربن خواهد بود؛ به‌طوری‌که در برخی از مناطق مطالعه‌شده اثرات مثبت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن توسط افزایش دمای بیش از حد مطلوب برای رشد و نمو گندم خنثی خواهد شد. پیش‌بینی تغییرات نیاز آبی برخی از محصولات کشاورزی دشت مشهد ناشی از تغییرات دمای هوا توسط شعبانی، موسوی بایگی و جباری نوقابی (۱۳۹۵، ص. ۱) نشان داد، تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل، بیشتر تحت‌تأثیر تغییرات دمای حداکثر خواهد بود. همچنین مقایسهٔ نیاز آبی محصولات مختلف بین دو دورهٔ آتی و پایه نشان‌دهندهٔ افزایش تبخیر و تعرق گیاهان در آینده است؛ به‌طوری‌که از بین پنج محصول منتخب (گندم، چغندرقند، گوجه فرنگی، یونجه و سیب) در دشت مشهد، چغندرقند دارای بیشترین درصد تغییرات نیاز آبی برابر با ۲/۸ درصد و معادل با ۲۹۰ متر معکب آب مصرفی در هر هکتار خواهد بود. فلاح قالهری، باعقیده و رضایی (۱۳۹۵، ص. ٤۹) در برآورد نیاز آبی محصول سیب‌زمینی در اقلیم تربت حیدریه و تخمین تبخیر و تعرق واقعی براساس تبخیر و تعرق مرجع دریافتند، میزان تبخیر و تعرق ۲/٦۳ برابر میانگین بارندگی در فصل رویش است؛ یعنی گیاه از رطوبت ذخیره‌شده برای تبخیر و تعرق استفاده کرده است؛ بدین‌ترتیب برای جبران تخلیهٔ رطوبتی باید گیاه آبیاری شود. فرهادی بانسوله، اسدی و حافظ-پرست (۱۳۹٦، ص. ۲۰۰) تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل ذرت و جو را در استان کرمانشاه

مطالعه کردند و نشان دادند، در آینده در اثر تغییر اقلیم، نیاز آبی گیاهان افزایش می‌یابد و اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق فصلی، تبخیر و تعرق حداکثر روزانه و دورهٔ رشد محصول ذرت در ایستگاه سنقر (منطقه سردسیر) بیشتر از ایستگاه کرمانشاه (منطقه معتدل) و خیلی بیشتر از ایستگاه سرپل ذهاب (منطقهٔ گرمسیر) خواهد بود.

یارمحمدی، ذاکری‌نیا، قربانی و سلطانی (۱۳۹٦، ص. ۹۷) در بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق و نیاز آبی گندم در منطقهٔ بجنورد نشان دادند، به‌خاطر کاهش طول فصل رشد گندم، اندازهٔ تبخیر و تعرق گندم به‌طور کلی تا سال ۲۱۰۰ کاهش می‌یابد، اما تبخیر و تعرق طی فصل رشد در تاریخ کشت‌های دیرتر، در دیم‌کاری، کاهش و در کشت آبی افزایش می‌یابد. با کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق، نیاز خالص آبیاری نیز تا پایان قرن حاضر کاهش می‌یابد، اما در هر دورهٔ زمانی با جابه‌جایی تاریخ کشت به‌سمت اواخر پاییز، بر مقدار آن افزوده می‌شود. عظیمی دزفولی و همکاران (۱۳۹٦، صص. ۱۳۱، ۱٤٦)، نیاز خالص آبیاری برای تولید گندم آبی و راندمان کاربرد مزارع گندم را مطالعه کرده و حجم آب موردنیاز برای آبیاری مزارع گندم آبی کشور را برآورد کردند. دشتی، باقری، پیش‌بهار و مجنونی (۱۳۹۷، ص. ٤۰۹) در ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق و عملکرد گندم دیم در شهرستان اهر نشان دادند، تغییر تبخیر و تعرق در اثر تغییر اقلیم افزایشی است. در زمینهٔ عملکرد محصول نیز متوسط عملکرد شبیه‌سازی‌شده برای دورهٔ آینده (۲۰۱٦–۲۰٤٥) در مقایسه با حالت مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برای دورهٔ پایه افزایشی است که بر اساس تغییر متغیرهای آب‌وهوایی متوسط عملکرد در دورهٔ پایه از ۰/۹٥٤ به ۰/۹۹۹ تن در هکتار در دورهٔ آتی افزایش یافت. براهیمی و غازی (۱۳۹۷، ص. ۱۹۹)، در به‌روزرسانی و بازنگری سند ملی آب در دشت‌های قزوین و فومنات، آب مورد نیاز الگوی کشت‌های مختلف در دورهٔ آماری ۱۹۷٦ تا ۲۰۰٥ را با روش پنمن–مانتیث فائو محاسبه کردند و نشان دادند که مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بین ۱۳۳۰ تا ۱٥۸۷/۱ میلی‌متر در دشت قزوین و ۷٤۳ تا ۸۰۹ میلی‌متر در دشت فومنات متغیر است. همانطور که ملاحظه می‌شود در پژوهش‌های فوق وضعیت تبخیر و تعرق و نیاز آبی، فراخور شرایط اقلیمی هر منطقه و نوع محصول متفاوت است. هدف از مطالعهٔ حاضر، بررسی تغییرات تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه و نیاز آبی دورهٔ رشد آن در ایران تحت شرایط تغییر

اقلیم است. بنابراین در این مطالعه به این پرسش پاسخ داده می‌شود که تغییرات تبخیر و تعرق گندم تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده چگونه خواهد بود؟ و اهداف مطالعه نیز عبارتند از:

۱. بررسی تغییرات تبخیر و تعرق گندم در دورهٔ آینده نسبت به دورهٔ پایه

۲. مقایسهٔ تغییرات مکانی تبخیر و تعرق در مناطق مختلف کشور

۳. مقایسهٔ تبخیر و تعرق گندم تحت دو سناریوی $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ در مناطق مختلف کشور

۳. روش‌شناسی تحقیق

برای انجام این مطالعه از داده‌های مدل گردش عمومی جو[1] (CCSM4) شامل دمای حداقل (درجهٔ سانتی‌گراد)، دمای حداکثر (درجهٔ سانتی‌گراد)، تابش خورشیدی (مگاژول بر مترمربع در ثانیه) و سرعت باد (متر بر ثانیه) در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵–۲۱۰۰ (دورهٔ پایه: ۲۰۰۵–۲۰۲۰، آیندهٔ نزدیک: ۲۰۲۱–۲۰۶۰ و آیندهٔ دور: ۲۰۶۱–۲۱۰۰) تحت دو سناریوی $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ استفاده شده است. داده‌های مشاهداتی نیز داده‌های ۱۰۹ ایستگاه سینوپتیک (شکل ۱) برای همان پارامترهای اقلیمی بودند.

مدل CCSM4 یک مدل گردش عمومی جو[2] (GCM) از سری مدل‌های CMIP5 است که توسط مرکز ملی تحقیقات جوی[3] (NCAR) اداره می‌شود. این مدل یک GCM جفت‌شده با قدرت تفکیک مکانی ۰/۹ درجهٔ عرض جغرافیایی در ۱/۲۵ درجهٔ طول جغرافیایی است که شامل اجزاء فعال جو، زمین، اقیانوس و یخ دریا که به‌هم متصل شده‌اند، می‌باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷، ص. ۵۱۹). داده‌های مدل CCSM4 از شبکهٔ سیستم زمینِ[4] (ESG) مرکز NCAR از پایگاه https://www.earthsystemgrid.org قابل دریافت است. کارآیی مدل CCSM4 در برآورد پارامترهای اقلیمی در سطح کشور قبلاً توسط مطالعات مختلف از جمله مطالعات معصوم‌پور سماکوش، میری و پورکمر (۱۳۹۶، ص. ۴۰)، قدیریان،

1. Community Climate System Model Version 4
2. General Circulation Model
3. National Center for Atmospheric Research
4. Earth System Grid

همـامی و سـفیانیان (۱۳۹۷، ص. ۱۲۹)، سـلمانی و مجـرد (۱۳۹۸، ص. ۳۰۱) و محمـدی، موحدی، محمدی و گلگاری (۱۳۹۹، ص. ۱۵۹) به اثبات رسیده است.

پس از استخراج داده‌های مدل گردش عمومی جو CCSM4، برای بالا بـردن دقـت کـار، قدرت تفکیک یاخته‌های آن با استفاده از قابلیت بستهٔ Resample در نـرم‌افـزار R (ژانـگ و همکـاران، ۲۰۱۷، ص. ۵۱۸؛ ژانـگ و همکـاران، ۲۰۱۹، ص. ۵۱۸)، از ۰/۹ درجـهٔ عـرض جغرافیایی در ۱/۲۵ درجهٔ طول جغرافیایی به ۰/۵ در ۰/۵ درجـه افـزایش پیـدا کـرد[1]. سـپس تعداد ٦٢٣ یاخته در سطح کشور تعریف شد که با توجه به نزدیک‌ترین فاصله به ایستگاه‌هـای مشاهداتی در نرم‌افزار AGWAT (در مورد این نرم‌افزار در ادامه توضـیح داده خواهـد شـد) تعداد ٦٠٣ یاخته انتخاب و مقادیر تبخیر و تعـرق در ایـن ٦٠٣ یاختـه در دورهٔ تـاریخی و دو دورهٔ آینده تحت دو سناریو با استفاده از فرمول پنمن–مانتیث فائو محاسبه شد. این محاسبه بر پایهٔ مقالهٔ معتبر شمارهٔ ٥٦ آبیاری و زهکشی فائو (آلن، پریرا، رائـس، و اسـمیت[2]، ۱۹۹۸، ص. ٦٥) با برنامه‌نویسی در پکیج SPEI نرم‌افزار R انجام گرفـت. در مرحلـهٔ بعـد، بـا اسـتفاده از رابطهٔ ۱ مقادیر تبخیر و تعرق گندم آبی در طول دورهٔ رشد (مرحلهٔ کاشت تا برداشت) در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵ الی ۲۱۰۰ به صورت ماهانه محاسبه گردید (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷، ص. ۵۲۲):

رابطهٔ ۱:
$$ET_c = K_c \times ET_O$$

که در آن ET_c تبخیر و تعرق واقعی محصول، K_c ضریب گیاهی گندم در مراحل مختلـف رشد و ET_o تبخیر و تعرق مرجع است. این محاسبه با نـرم‌افـزار CROPWAT انجـام شـد. دوره‌های رشد به چهار مرحلهٔ ابتدایی، رشد و توسعهٔ گیاه، میـانی و نهـایی تقسـیم مـی‌شـود. مراحل مختلف رشد در هر منطقه بسته به شرایط آب‌وهوایی متفاوت اسـت. مقـادیر ضـریب گیاهی برای مراحل اول، میانی و نهایی رشد با توجه به ارتفاع گیاه به دست می‌آید.

برای اعتبارسنجی برآورد تبخیر و تعرق با داده‌های مدل CCSM4، از برخی شاخص‌هـای آمـاری ماننـد RMSE، MAE و MAPE (سـلمانی، زراءنـژاد و کیـانی، ۱۳۹٦، ص. ۱۰۹)

---

۱. برای کسب اطلاعات بیشتر در زمینهٔ Resample و دستورات آن به دو منبع اینترنتی زیر مراجعه کنید:
https://cran.r-project.org/web/packages/resample/resample.pdf
https://www.uncg.edu/mat/qms/Resampling%20Methods%20Using%20R.pdf
2. Allen, Pereira, Raes & Smith

استفاده شد. این شاخص‌ها مبتنی بر مقایسهٔ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شدهٔ تبخیر و تعـرق در ایستگاه‌های هواشناسی در دورهٔ پایه است. همچنین برای ارائهٔ نتایج نهایی در قالب نقشـه‌-ها، از امکانات پهنه‌بندی نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ایستگاه‌های مورد استفاده و موقعیـت نقاط مرکزی یاخته‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. موقعیت یاخته‌ها و ایستگاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه در ایران

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

ازآنجاکه طول دورهٔ رشد گندم آبی پاییزه در مناطق مختلف کشور یکسان نیست و از ۵ تـا ۹ ماه و در تعداد معدودی از یاخته‌ها تا ۱۰ ماه متغیر است، در ترسـیم نقشـه‌هـای پهنـه‌بنـدی ماهانه، مناطقی که در یک ماه فاقد دورهٔ رشد گندم آبی بودند، در نقشهٔ مرتبط به رنـگ سـفید نشان داده شده‌اند؛ ازاین‌رو تعداد یاخته‌های نقشه‌ها در ماه‌های مختلف سـال متفـاوت اسـت. جدول ۱ تعداد یاخته‌های نقشهٔ هر ماه را با توجه به گسترهٔ مکانی رشد گنـدم آبـی در آن مـاه نشان می‌دهد. از طرف دیگر با توجه به اینکه در ماه‌های آغاز و خاتمهٔ کشت گندم آبی در هر یاخته ممکن است تاریخ‌های شروع و خاتمهٔ کشت دقیقاً منطبق با ابتدا یا انتهای آن ماه نباشـد و تنها بخشی از آن ماه را در بر بگیرد، بنابراین مقادیر تبخیر و تعرق فقط برای تعداد روزهایی از آن ماه که گندم آبی روی زمین مستقر بوده است، محاسبه شده و در نقشه‌ها نشان داده شده

است؛ ازاین‌رو در نقشه‌های دو ماه ابتدایی و انتهایی دورهٔ رشد، طول دورهٔ رشـد محصـول در نقاط مختلف کشور متفاوت است.

شایان ذکر است که تاریخ کاشت، طول مراحل رشد و ضریب گیـاهی گنـدم از نـرم‌افـزار AGWAT که بر مبنای سند ملی آب کشور است، استخراج شده است. ایـن نـرم‌افـزار بـرای محاسبهٔ نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در شرایط استاندارد و غیراستاندارد تهیه شـده اسـت و بانک اطلاعات گیاهی و هواشناسی آن حاوی آمار روزانهٔ کلیهٔ ایستگاه‌های هواشناسی کشـور، تقسیمات استانی، فهرست دشت‌های موجود در هر استان و مشخصات عمـومی دشـت‌هـا از قبیل حوضهٔ آبریز، ناحیهٔ اقلیمی، اطلاعات گیاهی، بافت خاک و راندمان آبیاری است. علیـزاده و همکـــاران در ســـال ۸۱–۱۳۸۰ ایـــن نـــرم‌افـــزار را طراحـــی کردنـــد و از طریـــق AGWAT@irimet.net قابل‌دریافت است. تـاریخ کاشـت، طـول مراحـل رشـد و ضـریب گیاهی گندم آبی بـرای هـر یاختـه، از اطلاعـات فایـل گیـاه گنـدم در نزدیـک‌تـرین ایسـتگاه (شهرستان) موجود در نـرم‌افـزار AGWAT کـه کمتـرین فاصـله را بـا یاختـهٔ مـدنظر دارد، استخراج شده و به آن یاخته تعمیم داده شده است.

جدول ۱. توزیع تعداد یاخته‌ها در نقشه‌های ماه‌های مختلف دورهٔ رشد گندم آبی پاییزه در ایران

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

ماه	اُکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای
تعداد یاخته	۲۰۹	۵۷۴	۶۰۳	۶۰۳	۶۰۳	۶۰۳	۵۷۱	۴۶۲	۲۶۶	۲۲

۴. مبانی نظری تحقیق

۴. ۱. مدل‌های سیاره‌ای آب‌وهوا (GCM)

مدل‌های سیاره‌ای مهم‌ترین و شاخص‌ترین نوع مدل‌های آب‌وهوایی هستند؛ به‌طـوری‌کـه تمامی پدیده‌های مؤثر بر آب‌وهوا را در مقیاس کل سیارهٔ زمین نشان مـی‌دهنـد. آب‌وهـوا در مقیاس مدل‌های سیاره‌ای شبیه‌سازی تمام ویژگی‌های سه‌بعدی آب‌وهواسـت و بـه ایـن دلیـل جامع‌ترین مدل‌های جوی هستند (شمسی‌پور، ۱۳۹۳، ص. ۱۰۱). در وضعیت کنونی با توجـه

به تغییر اقلیم و کمبود منابع آب، یکی از راه‌های کاهش تلفات آب در مزارع، برنامه‌ریزی صحیح آبیاری است که اساس آن را برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان تشکیل می‌دهد. تعیین نیاز آبی گیاهان رکن اساسی در طرح‌های آبیاری بوده که لازمهٔ آن محاسبه تبخیر و تعرق سطوح گیاهی مرجع (ETo) در هر منطقه است (مدیری، ۱۳۹۷، ص. ۱۲۷). تبخیر و تعرق یکی از اجزای اصلی چرخهٔ هیدرولوژی است. درواقع، ETo توان تبخیر اتمسفر در یک موقعیت و زمان معین از سال را نشان می‌دهد و مشخصات محصول و عوامل خاک را در برنمی‌گیرد (براتی، عابدی کوپایی، درویشی، آذری و یوسفی، ۱۳۹۷، ص. ٥٤٤). تبخیر و تعرق محصول به‌عنوان مقدار آبی که می‌تواند از یک سطح کاملاً پوشیده از گیاه بدون محدودیت آب در منطقهٔ ریشه از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر شود، تعریف می‌شود و تخمین آن در مقیاس نقطه‌ای با روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که می‌توان به روش‌های مستقیم (لایسیمتر) و غیرمستقیم (تشتک تبخیر، روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی و فیزیکی) اشاره کرد. در روش‌های غیرمستقیم، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه با برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) و ضرب‌کردن آن در ضریب گیاهی (Kc) تعیین می‌شود (مرادی، کمالی و وظیفه‌دوست، ۱۳۹٤، ص. ٤٠). برآورد ETc بر دو مرحله متکی است: ابتدا ETo تعیین می‌شود و سپس ETc به‌عنوان حاصل‌ضرب ETo و ضریب گیاهی Kc برای یک روز محاسبه می‌شود. جنسن[1] مفهوم Kc را مطرح کرد و سپس سایر محققان آن را توسعه دادند. ضریب گیاهی عبارت است از نسبت تبخیر و تعرق واقعی محصول (ETc) به تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) (لازارا و رانا ، ۲۰۱۰، ص. ۸). گندم گیاهی است از خانوادهٔ Poaceae و از جنس Tiriticum که خودلقاح و دوجنسی است. گندم معمولی انواع بهاره و پاییزه دارد. در تقسیم‌بندی دیگر، گندم‌های معمولی انواع سخت و نرم دارند. سختی و نرمی علاوه‌بر خصوصیات ژنتیکی به عوامل محیطی نیز بستگی دارد. گندم‌های معمولی از نظر خصوصیات گیاه‌شناسی مثل داشتن یا نداشتن ریشک، متراکم یا نیمه‌متراکم بودن یا باز بودن محور سنبله، ارتفاع و غیره شکل‌های گوناگون دارند. مهم‌ترین ویژگی‌های گیاه گندم، جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، تشکیل روزت، ساقه - رفتن و تشکیل گل و تشکیل میوه است (یدالهی، ۱۳۹۲، ص. ۷).

1. Jensen

۵. یافته‌های تحقیق

نتایج مقایسهٔ مقادیر تبخیر و تعرق مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شدهٔ سالانهٔ ایستگاه‌ها در دورهٔ رشد با استفاده از شاخص‌های صحت‌سنجی در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر جدول، مقادیر میانگین ۱۰۹ ایستگاه است. اختلافات بین دو سری مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در دورهٔ پایه در حد معقول و از ۱۹/٤۸ میلی‌متر در شاخص MAE تا ۲۳/۷۷ میلی‌متر در شاخص RMSE متغیر است که با توجه به ارقام شاخص MAPE، مقادیر برآوردشدهٔ تبخیر و تعرق تحت دو سناریوی $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی به‌ترتیب ۲/۲٦ و ۲/۲٤ درصد اختلاف نشان می‌دهد که اختلاف قابل‌قبولی به حساب می‌آید و حکایت از کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی مقادیر تبخیر و تعرق دارد.

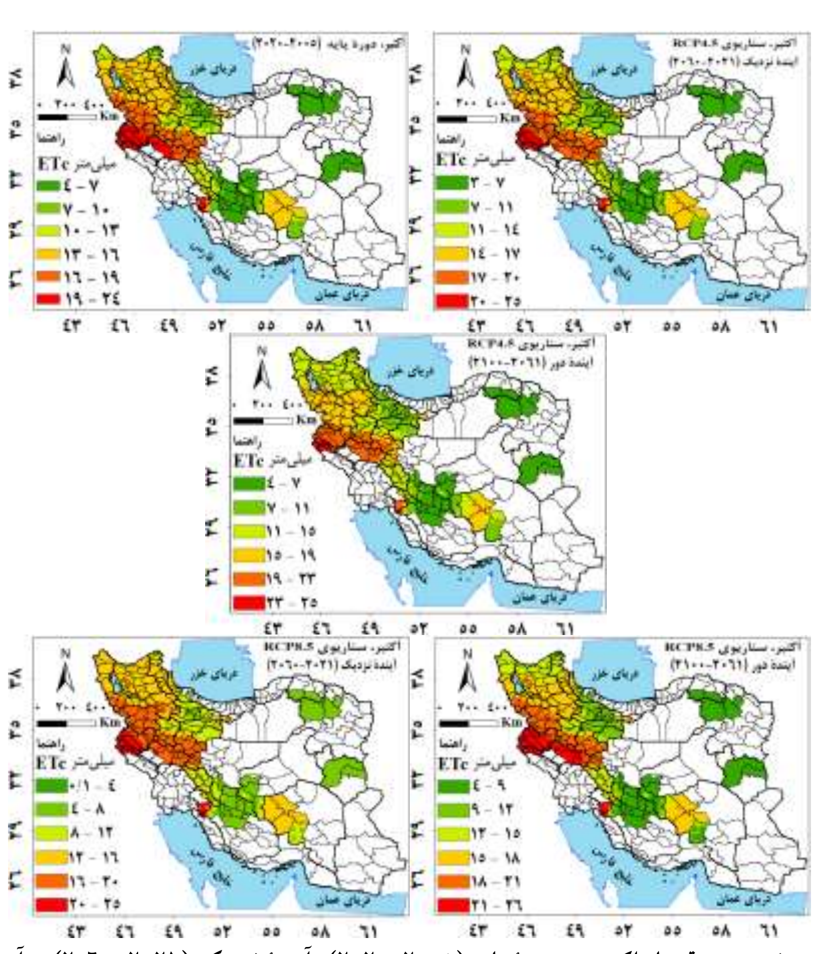
جدول ۲. شاخص‌های صحت‌سنجی بین مقادیر تبخیر و تعرق مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شدهٔ دورهٔ رشد ایستگاه‌ها در دورهٔ پایه (میانگین ایستگاه‌ها)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

سناریو/شاخص	MAE (میلی‌متر)	RMSE (میلی‌متر)	MAPE (درصد)
سناریوی RCP4.5	۱۹/٤۸	۲۳/٥٦	۲/۲٦
سناریوی RCP8.5	۱۹/۷۲	۲۳/۷۷	۲/۲٤

برپایهٔ نتایج تحقیق، تقریباً در یک‌سوم از مناطق کشور تاریخ شروع کشت گندم آبی پاییزه، یکی از روزهای ماه اُکتبر است. این مناطق به‌طور عمده در قسمت‌های شمال غرب، بخشی از غرب به سمت جنوب غرب و دو پهنهٔ جداگانه در شرق و شمال شرق کشور قرار گرفته‌اند (شکل ۲). تاریخ شروع کشت به میزان زیادی متأثر از شرایط رطوبتی خاک و فراهم بودن وضعیت زمین برای آغاز کشت است و در بخش‌هایی از کشور که از بارش و رطوبت مناسب در ماه اکتبر بهره‌مند هستند، کشت گندم آبی آغاز می‌شود. بررسی مقادیر تبخیر و تعرق محصول (ET_c) در دورهٔ پایه و دو دورهٔ آینده تحت دو سناریوی $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ تفاوت-های ملموسی را نشان نمی‌دهد. مقدار تبخیر و تعرق در دورهٔ پایه بین ٤ تا ۲٤ میلی‌متر در ماه متغیر است و در دو دورهٔ آینده، بین ۰/۱ تا ۲٦ میلی‌متر در ماه نوسان می‌کند. گسترهٔ مقادیر

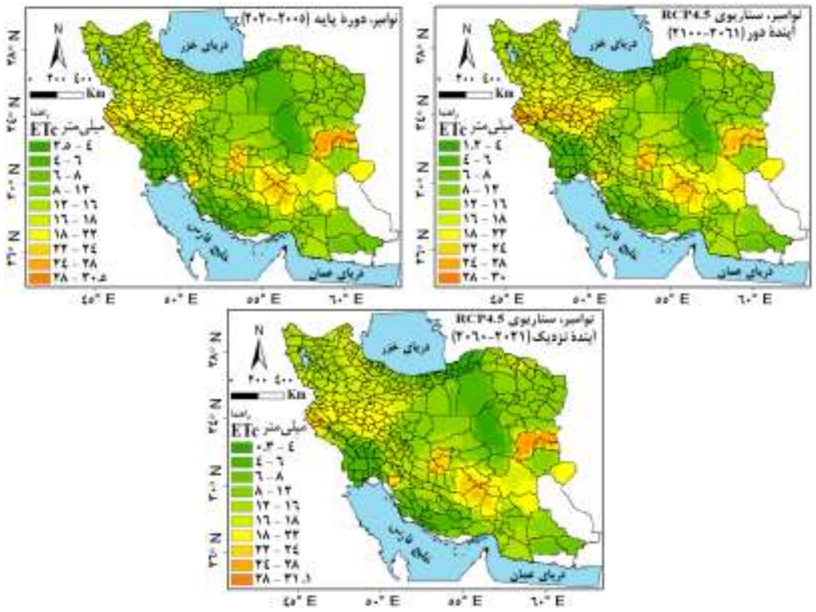
بیشینهٔ ۱۵ میلی‌متر و بیشتر، در سناریوی RCP8.5 در هر دو دورهٔ آینده بیشتر از سناریوی RCP4.5 است که تاحدودی منعکس‌کنندهٔ شرایط بدبینانهٔ این سناریوست. به‌طورکلی، دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تغییر چشمگیری در هسته‌های بیشینه و کمینه در سه دوره نشان نمی‌دهند. در این ماه تبخیر و تعرق بیشتر ناشی از تبخیرِ سطح خاک است؛ زیرا در این زمان هنوز بذر گندم در زیر خاک قرار دارد و تعرق روی نمی‌دهد (شکل ۲).

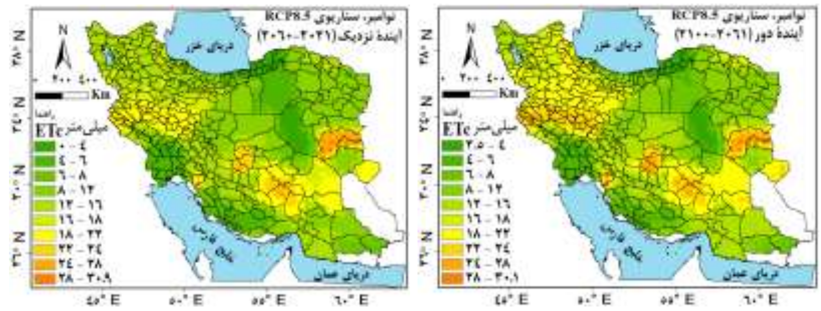


شکل ۲. تبخیر و تعرق ماه اکتبر در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

در ماه نوامبر کشت گندم آبی در کل کشور به‌استثنای بخشی از جنوب شرق آغاز شده است. در ۵۷٤ یاخته از ٦۰۳ یاختهٔ بررسی‌شده، مراحل مختلف دورهٔ کشت گندم در حال سپری شدن است. بررسی نتایج در دوره‌های مختلف این ماه نشان‌دهندهٔ الگوی بیشینهٔ نسبی در غرب استان کرمان و شمال استان خراسان جنوبی است که تاریخ شروع کشت آن در ماه اُکتبر بوده است. مقادیر ET_c در این هستهٔ بیشینه، بین ۲۲ تا ۳۰/۵ میلی‌متر در ماه متغیر است؛ این در حالی است که در سایر مناطق کشور مقادیر ET_c کمتر از ۲۲ میلی‌متر و غالباً بین ۲/۵ تا ۱۸ میلی‌متر است. مقادیر ET_c در هر دو دورهٔ آینده (۲۰۲۱–۲۰٦۰ و ۲۰٦۱–۲۱۰۰) تحت دو سناریوی $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ نسبت به دورهٔ پایه افزایش می‌یابد که این افزایش در آیندهٔ دور (۲۰٦۱–۲۱۰۰) بیشتر از آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰٦۰) است (شکل ۳).



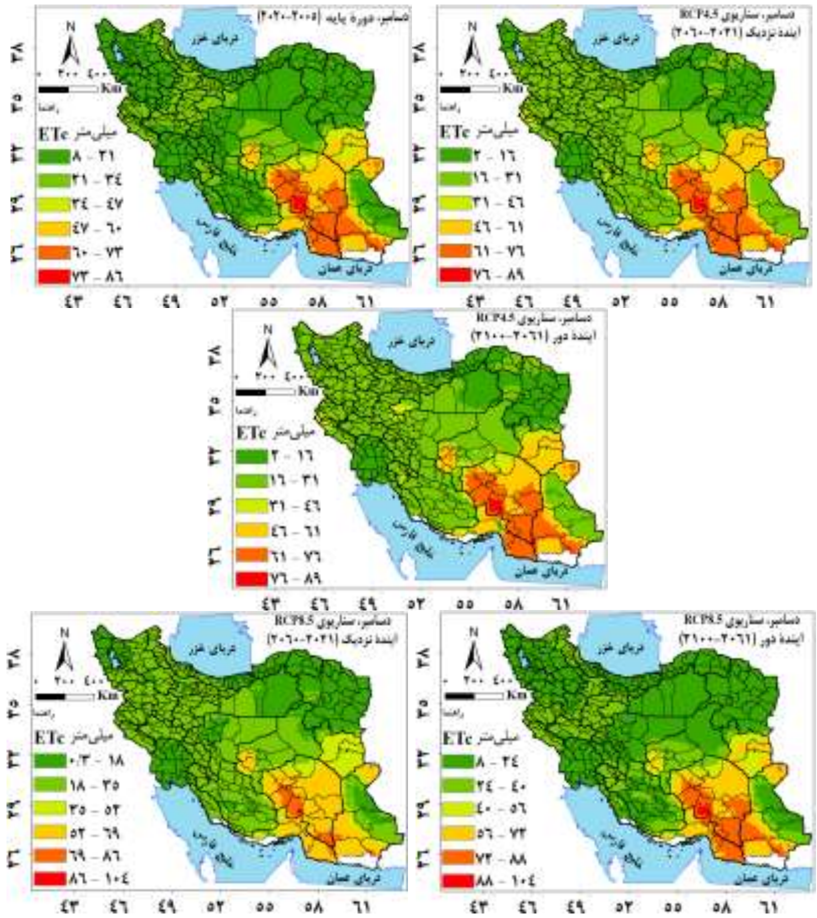


شکل ۳. تبخیر و تعرق ماه نوامبر در دورهٔ پایه (۲۰۰۵-۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

در ماه دسامبر بخشی از جنوب شرق کشور که در ماه نوامبر زیر کشت گندم آبی قرار نگرفته بود، به زیر کشت می‌رود و تمام مناطق قابل‌کشت، اکنون در حال سپری کردن دورهٔ رشد خود هستند. مناطقی که در حاشیهٔ خلیج فارس و دریای عمان به رنگ سفید نمایان شده‌اند، مناطقی هستند که در نرم‌افزار AGWAT فاقد اطلاعات کشت گندم (ضریب گیاهی، تاریخ آغاز کشت و طول دورهٔ رشد) بودند و درواقع، در آن مناطق گندم کشت نمی‌شود. همان‌گونه که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، در تمام دوره‌های هر دو سناریو بخشی از جنوب شرق که در این ماه زیر کشت گندم آبی قرار گرفته است و در مراحل ابتدایی دورهٔ رشد قرار دارد، حداقل مقدار ET_c را دارد. همچنین نیمهٔ شمالی کشور به‌سمت جنوب غرب به‌دلیل فراگیر شدن سیستم‌های بارشی در اواخر فصل پاییز و کاهش دما و از طرف دیگر شروع مرحلهٔ آغازین دورهٔ کشت در برخی از مناطق، کمترین مقادیر ET_c را دارد. مطلب دیگری که از بررسی نقشه‌ها برمی‌آید، گسترش هستهٔ بیشینه‌ای است که در ماه نوامبر روی استان کرمان مستقر بود. این هسته در ماه دسامبر به‌سمت جنوب شرق و جنوب گسترش می‌یابد و مقادیر نسبتاً زیاد ET_c را نشان می‌دهد. الگوی توزیع مکانی طبقات مختلف ET_c در نقشه‌های مربوط به هر دو سناریو به‌طور درخور توجهی یکسان است. وجه تمایز نقشهٔ مقادیر ET_c ماه دسامبر، وجود مقادیر بیشینهٔ ٨٦ تا ١٠٤ میلی‌متر در آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱-۲۰٦۰) و ٨٨ تا ١٠٤ میلی‌متر در آیندهٔ دور (۲۰٦۱-۲۱۰۰) در سناریوی $RCP_{8.5}$ است؛ این در حالی است که در

سناریوی $RCP_{4.5}$ حداکثر مقدار تبخیر و تعرق، کمتر از ۹۰ میلی‌متر در ماه است و در مقایسه با دورهٔ پایه افزایش درخور توجهی را نشان نمی‌دهد.

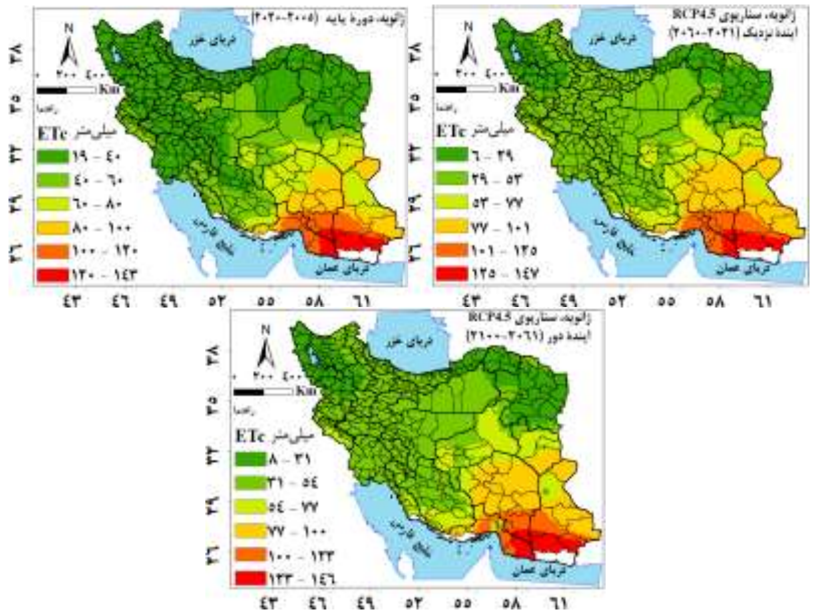


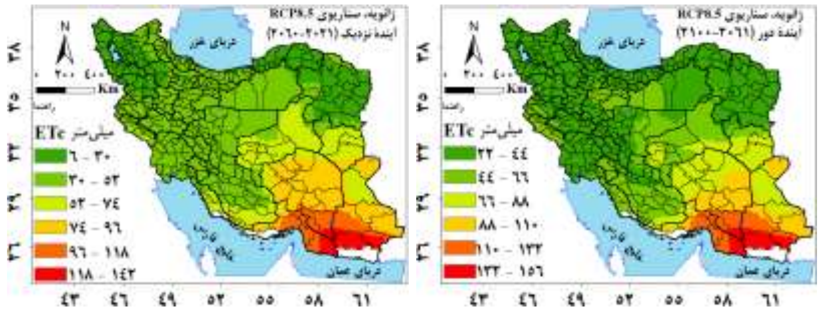
شکل ٤. تبخیر و تعرق ماه دسامبر در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰٦۰) و آیندهٔ دور (۲۰٦۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

بررسی نقشه‌های ماه ژانویه (شکل ٥) حاکی از آن است که در قسمت‌های شمال غرب، جنوب غرب، شمال و شمال شرق کشور مقادیر حداقل ET_c گندم آبی در دو دورهٔ آینده در مقایسه با دورهٔ پایه (به‌استثنای آیندهٔ دور در سناریوی $RCP_{8.5}$) کاهش خواهد یافت. این امر

می‌تواند از یک سو ناشی از افزایش رطوبت به‌دلیل ثبات و پایداری نسبی بارش‌ها و از طرف دیگر دمای پایین هوا در فصل زمستان باشد که به کاهش میزان تبخیر و تعرق منجر می‌شود. از سوی دیگر می‌توان به تفاوت مراحل رشد گندم اشاره کرد که به تفاوت در میزان تبخیر و تعرق از سطح گیاه منجر خواهد شد؛ بنابراین در مناطق جنوب، جنوب شرق و بخشی از شرق کشور که محصول در دوره‌های بعد از مرحلهٔ اولیهٔ کشت یا به‌عبارتی در دورهٔ میانی کشت قرار دارد، میزان تبخیر و تعرق در مقایسه با سایر مناطق، بیشتر و بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر در ماه خواهد بود. این الگو در دورهٔ پایه و دو دورهٔ آینده کاملاً مشهود است؛ با این تفاوت که در آیندهٔ دور (۲۱۰۰–۲۰٦۱) تحت سناریوی RCP8.5 دامنهٔ نوسان آن در محدودهٔ ۱۱۰ تا ۱۵٦ میلی‌متر در ماه قرار می‌گیرد. مقایسهٔ دورهٔ پایه با دو دورهٔ آینده نشان‌دهندهٔ کاهش مقادیر حداقل است؛ به این صورت که در سناریوی RCP4.5 مقادیر حداقل از ۱۹ میلی‌متر در ماه به ٦ و ۸ میلی‌متر در ماه به‌ترتیب در آیندهٔ نزدیک و آیندهٔ دور کاهش می‌یابد، اما در سناریوی RCP8.5 این مقادیر از ۲۱ میلی‌متر در ماه به ٦ و ۲۲ میلی‌متر در ماه به‌ترتیب در آیندهٔ نزدیک و آیندهٔ دور تغییر می‌یابد که در آیندهٔ دور، اندکی افزایش را نشان می‌دهد.

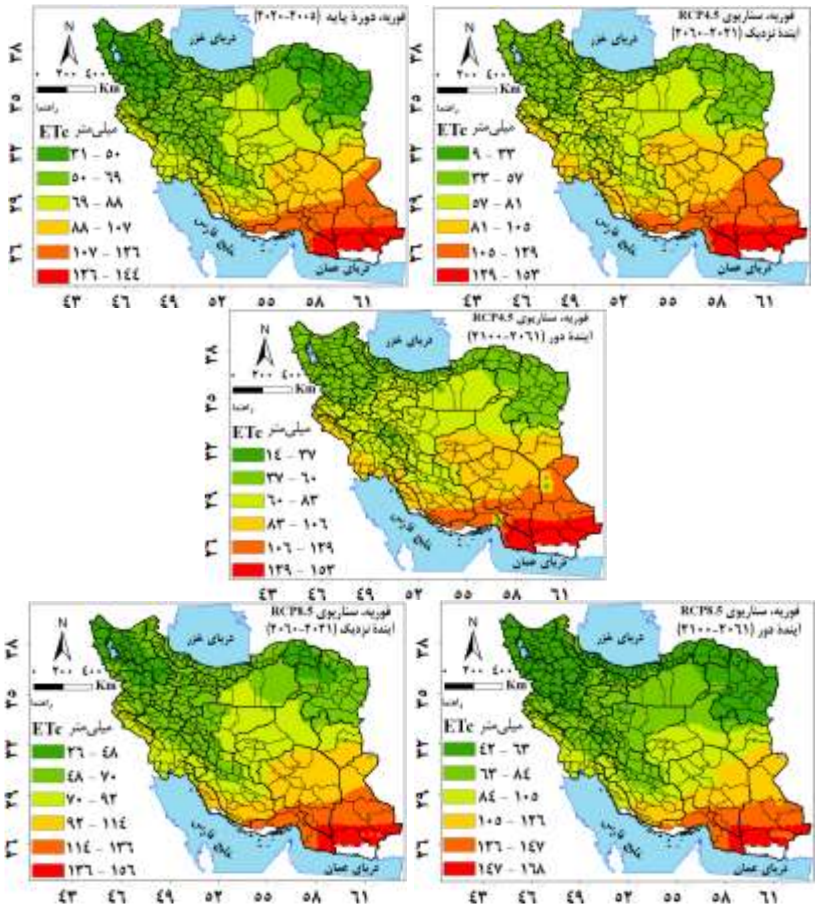




شکل ۵. تبخیر و تعرق ماه ژانویه در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

در ماه فوریه، الگوی بیشینهٔ مستقر روی قسمت‌های جنوب و جنوب شرق کشور، به‌سمت نواحی مرکزی، حاشیهٔ خلیج فارس و به میزان کمتری بخش‌های غربی گسترش می‌یابد. این گسترش تا اندازهٔ زیادی نشان‌دهندهٔ نقش مراحل مختلف دورهٔ کشت است که به‌صورت فزاینده باعث افزایش تبخیر و تعرق گندم می‌شود؛ به این صورت که در منطقهٔ جنوب شرق که جزء مناطق زودرس محصول در مقایسه با سایر مناطق است، مقدار تبخیر و تعرق به حداکثر رسیده است و با روند تدریجی نزولی در مقدار، به‌سمت مرکز و به‌طورکلی نیمهٔ شمالی کشور پیش می‌رود. در سه دوره، شباهت مکانی زیادی از نظر الگوی قرارگرفتن طبقات مختلف مقادیر تبخیر و تعرق به چشم می‌آید. در این ماه در تمام دوره‌ها، مقادیر حداقل و حداکثر در مقایسه با دورهٔ پایه افزایش یافته است که این موضوع می‌تواند ناشی از قرارگرفتن در مرحلهٔ توسعهٔ رشد سبزینه‌ای و افزایش ارتفاع گیاه باشد؛ چراکه افزایش این دو، افزایش تبخیر و تعرق و آب مصرفی گیاه را به همراه دارد (شکل ۶).



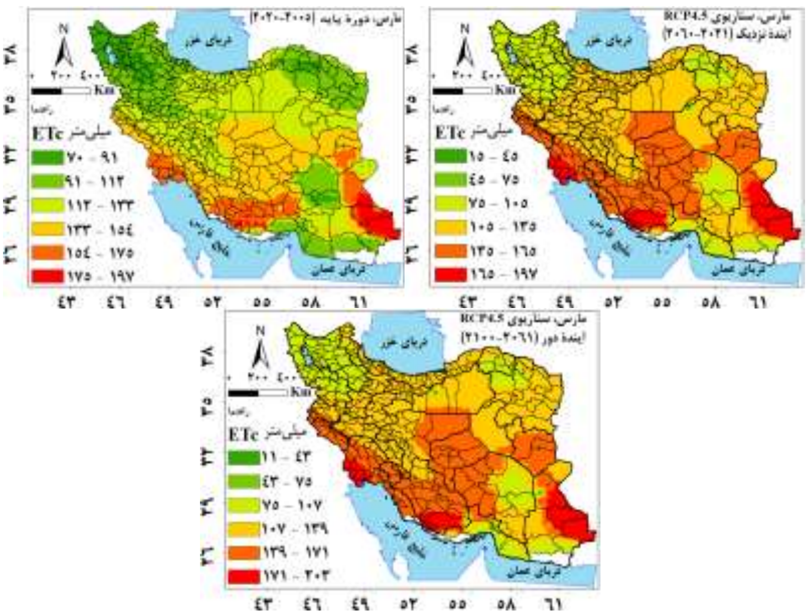
شکل ٦. تبخیر و تعرق ماه فوریه در دورهٔ پایه (۲۰۰۵-۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱-۲۰٦۰) و آیندهٔ دور (۲۰٦۱-۲۱۰۰)

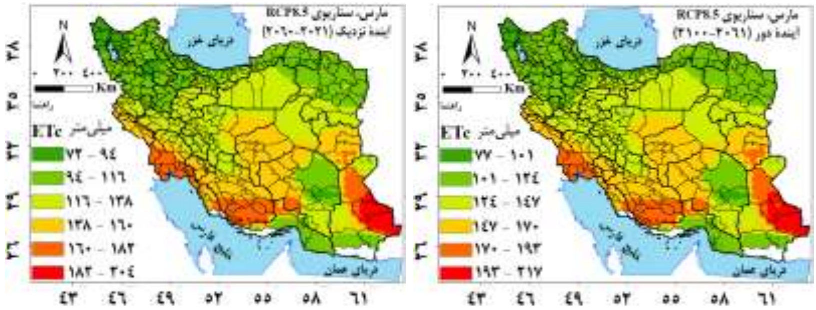
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

بررسی نقشه‌های تبخیر و تعرق ماه مارس، کاهش درخور توجه حداقل تبخیر و تعرق را در مقایسه با دورهٔ پایه تحت سناریوی RCP4.5 نشان می‌دهد. همان‌طورکه پیش‌تر ذکر شد، تغییر در مراحل رشد گیاه باعث تغییر در مقدار تبخیر و تعرق و به تبعیت از آن تغییر در مقدار نیاز آبی می‌شود. مصداق بارز این وضعیت، قرارگرفتن گوشهٔ جنوب شرقی کشور در محدودهٔ حداکثر تبخیر و تعرق است. در این ماه رشد محصول به مرحلهٔ میانی خود رسیده است. به‌علاوه، استان‌های فارس، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان نیز در این طبقه

قرار گرفته‌اند. بخشی از استان کرمان و سواحل دریای عمان به‌دلیل نزدیک شدن به مرحلهٔ برداشت محصول در طبقهٔ حداقل تبخیر و تعرق قرار گرفته‌اند. روی‌هم‌رفته مناطق مختلف کشور با توجه به قرارگرفتن در هریک از مراحل رشد گندم (آغازین، توسعه، میانی و پایانی)، در طبقات متفاوتی از تبخیر و تعرق قرار می‌گیرند که در مقایسه با ماه قبل یا بعد تفاوت درخور ملاحظه‌ای را در مقدار تبخیر نشان می‌دهد.

مقدار تبخیر و تعرق در سطح کشور تحت سناریوی RCP8.5 در آیندهٔ نزدیک بین ۷۲ تا ۲۰٤ میلی‌متر و در آیندهٔ دور بین ۷۷ تا ۲۱۷ میلی‌متر در ماه است که بیشتر از مقادیر سناریوی RCP4.5 است. حداکثر تبخیر و تعرق در آیندهٔ دور (۲۱۰۰–۲۰٦۱) تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 به ترتیب ۲۱۷ و ۲۰۳ میلی‌متر است که در مقایسه با آیندهٔ نزدیک (۲۰٦۰–۲۰۲۱) افزایش به‌ترتیب به میزان ۱۳ و ٦ میلی‌متر در ماه را نشان می‌دهد (شکل ۷).

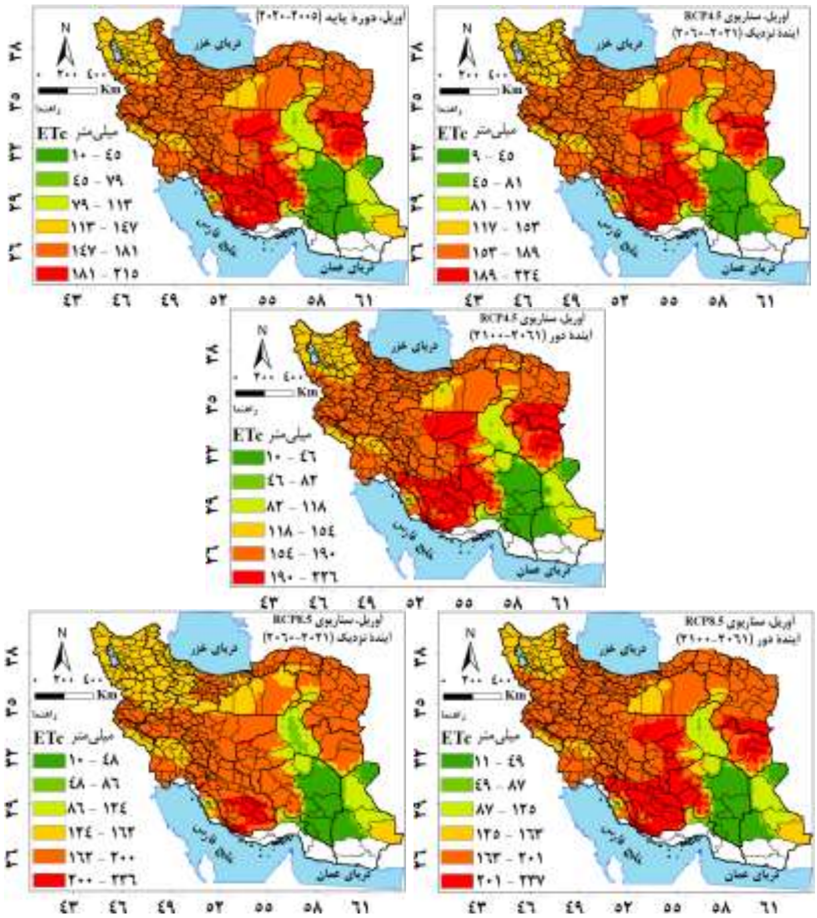




شکل ۷. تبخیر و تعرق ماه مارس در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۱۰۰–۲۰۶۱)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

در ماه آوریل تبخیر و تعرق در اکثر نقاط کشور در دورهٔ پایه بیشتر از ۱۴۷ میلی‌متر در ماه است. در دو دورهٔ آینده مقادیر تبخیر و تعرق تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی دیگر است. الگویی که در تمام دوره‌ها مشاهده‌شدنی است، موقعیت مکانی طبقات مختلف مقادیر تبخیر و تعرق در تمام یاخته‌هاست. حداقل میزان تبخیر و تعرق، در جنوب شرق و نیمهٔ شرقی استان‌های کرمان و یزد دیده می‌شود که حاکی از نزدیک شدن این مناطق به پایان دورهٔ کشت است. درمجموع، در تمام نقشه‌ها تبخیر و تعرق در این مناطق کمتر از ۱۲۵ میلی‌متر در ماه است و سایر مناطق در طبقات بیشتر از ۱۲۵ میلی‌متر و تا مقدار حداکثر ۲۳۷ میلی‌متر قرار می‌گیرد. نکته‌ای که در نقشه‌های این ماه مشاهده‌شدنی است، خارج شدن نواحی ساحل دریای عمان از طبقات تبخیر و تعرق است که نشان‌دهندهٔ تمام شدن دورهٔ کشت و برداشت محصول است (شکل ۸).

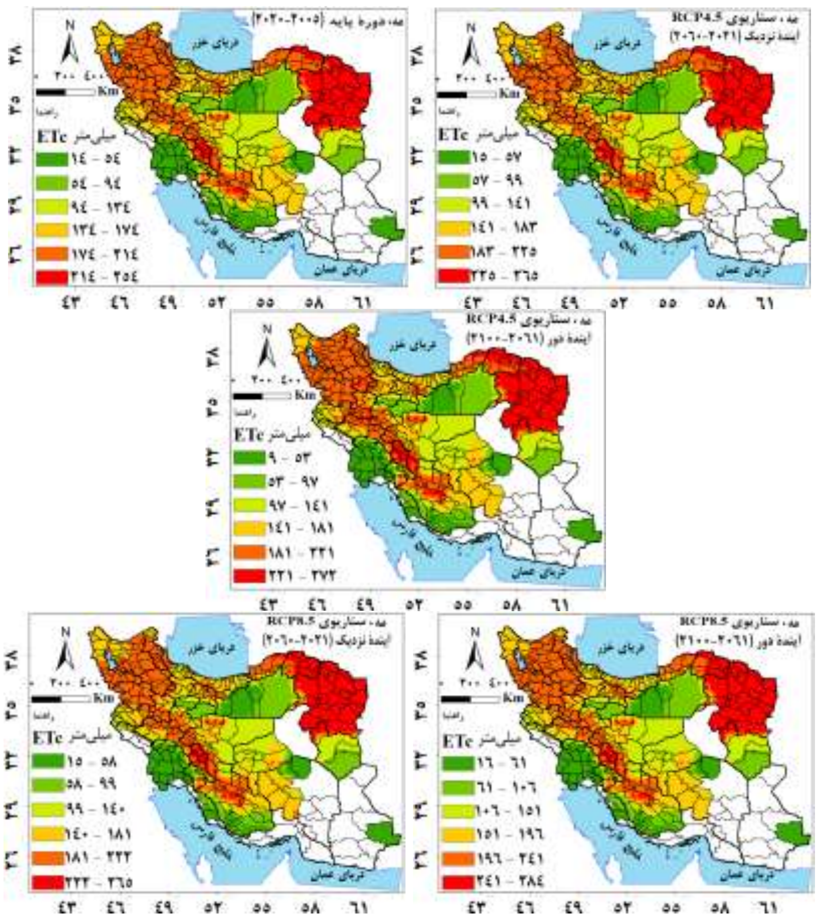


شکل ۸. تبخیر و تعرق ماه آوریل در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

در ماه مه همانند ماه آوریل مقادیر تبخیر و تعرق در سطح کشور زیاد ست. در این ماه، دورهٔ کشت گندم آبی در بخش‌هایی از استان‌های یزد و کرمان، سواحل جنوب و استان سیستان و بلوچستان به پایان رسیده است و فقط شهرستان سراوان به‌همراه برخی مناطق دورتر که در طبقهٔ حداقل تبخیر و تعرق قرار دارند، مرحلهٔ پایانی کشت خود را می‌گذرانند. بخش‌های شمال شرق و شمال غرب و نوار باریکی در امتداد رشته‌کوه زاگرس، به‌دلیل قرارگرفتن در مرحلهٔ میانی و گل‌دهی، بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق را به خود اختصاص

داده‌اند. به‌طورکلی، در این ماه الگوی توزیع مکانی تبخیر و تعرق در تمـام دوره‌هـا تحـت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 یکسان است و تفاوت چشمگیری بین نقشه‌هـا مشـاهده نمـی‌شود. مقادیر تبخیر و تعرق در دورهٔ آینده در مقایسه با دورهٔ پایه افزایش یافته اسـت کـه ایـن افزایش در آیندهٔ دور بیشتر از آیندهٔ نزدیک است (شکل ۹).

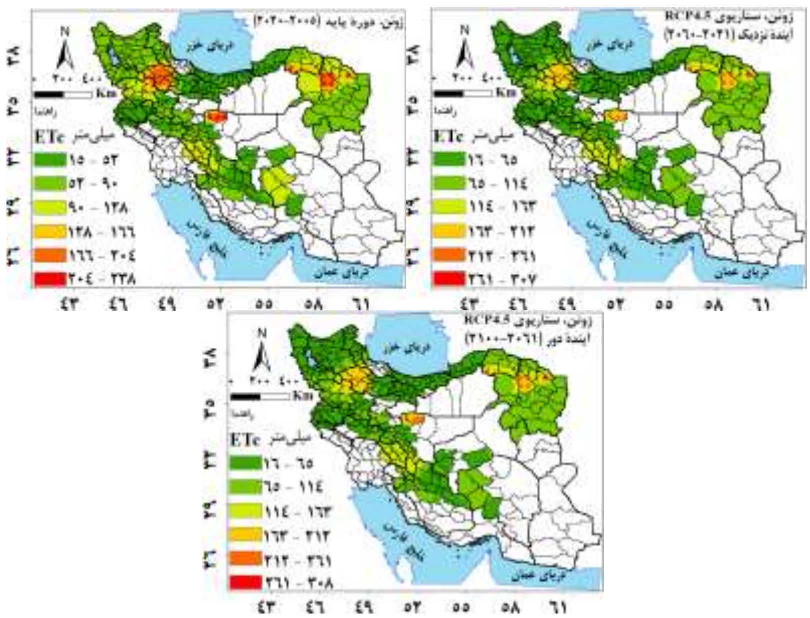


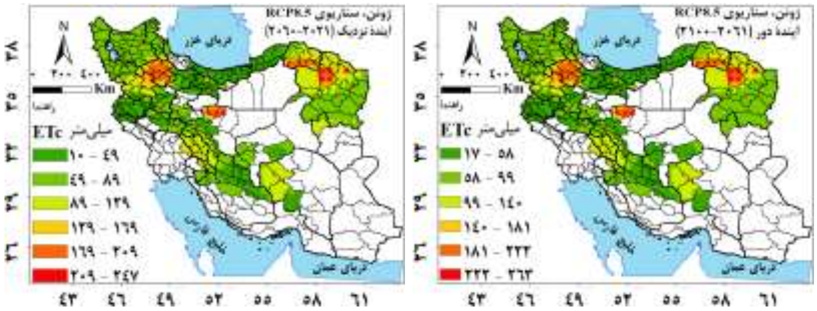
شکل ۹. تبخیر و تعرق ماه می در دورهٔ پایه (۲۰۰۵-۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

در ماه ژوئن دامنهٔ نوسان مقادیر تبخیر و تعرق گندم آبی در سطح کشور در دورهٔ پایه بین ۱٦ الی ۲۳۸ میلی‌متر قرار می‌گیرد. در دو دورهٔ آیندهٔ نزدیک و دور تبخیر و تعرق در هر دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 بیشتر از دورهٔ پایه است، با این تفاوت که مقدار اختلاف نسبت به دورهٔ پایه در سناریوی RCP4.5 بیشتر است.

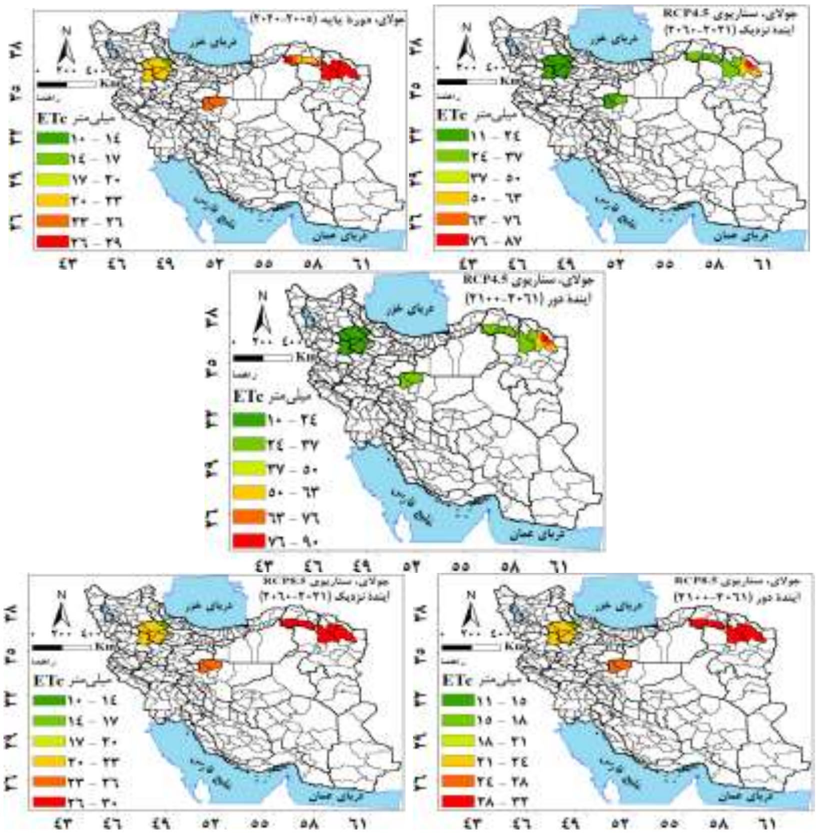
بخش‌های درخور توجهی از کشور در نقشه‌های ماه ژوئن در مرحلهٔ پایانی و برداشت قرار دارند؛ به همین دلیل، در مقایسه با سایر مناطق کمترین مقادیر تبخیر و تعرق دارند. تبخیر و تعرق در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب کمتر از ۱۱٤ و ۱۰۰ میلی‌متر در ماه است و سه هستهٔ بیشینهٔ کوچک که در شمال شرق، مرکز و شمال غرب باقی مانده‌اند، به یاخته‌هایی مربوط هستند که دورهٔ رشد گندم آبی در آن‌ها به پایان نرسیده است و برداشت محصول در ماه جولای انجام خواهد شد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).





شکل ۱۰. تبخیر و تعرق ماه ژوئن در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰)

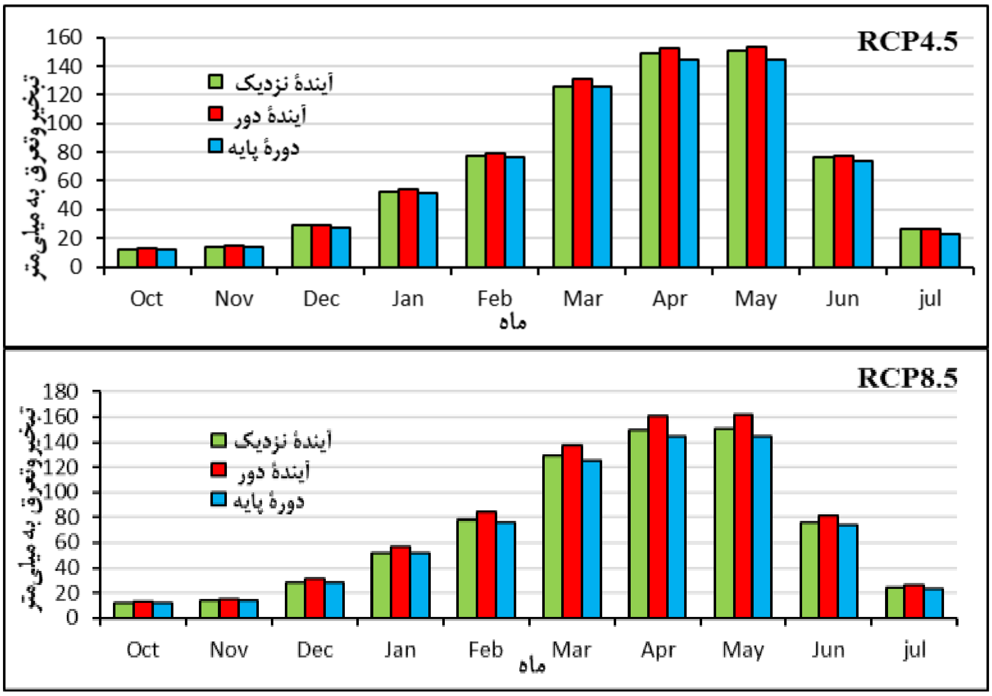
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰



شکل ۱۱. تبخیر و تعرق ماه جولای در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

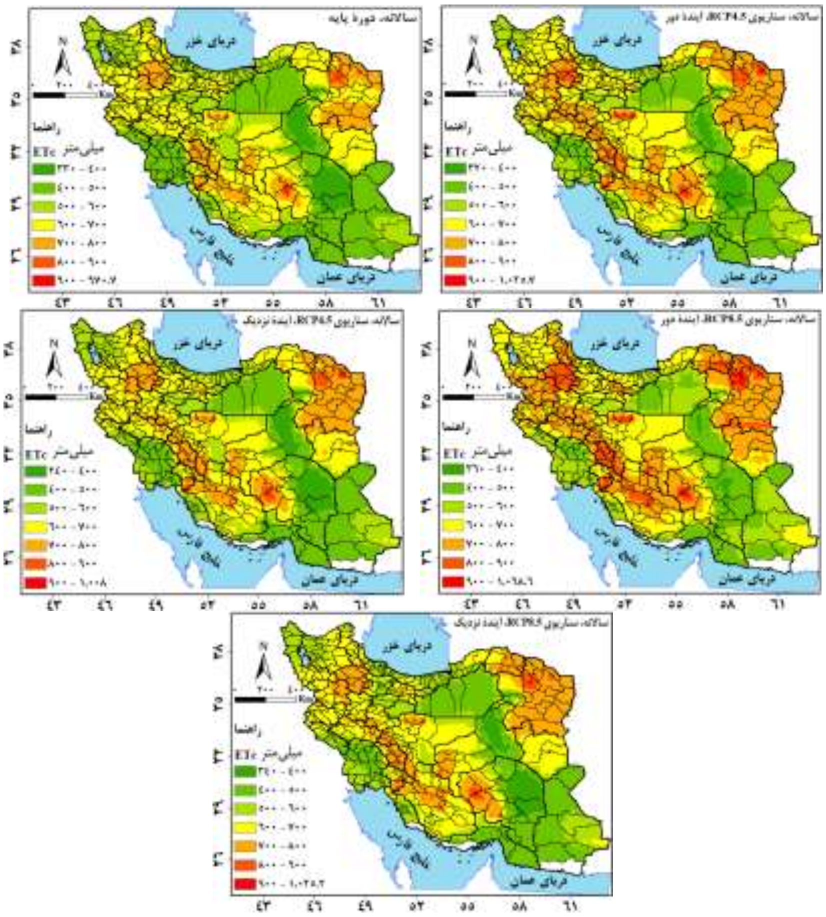
شکل ۱۲، نمودارهای میانگین ماهانهٔ تبخیر و تعرق گندم آبی را در ماه‌های مختلف دورهٔ کشت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر سه دوره تحت دو سناریوی $RCP_{8.5}$ و $RCP_{4.5}$ تبخیر و تعرق گندم در دو ماه اُکتبر و نوامبر که مصادف با تاریخ‌های شروع کشت در بیشتر مناطق کشور است، کمتر از ۲۰ میلی‌متر در ماه است. این مقدار در ماه ژانویه به‌حدود ٦۰ میلی‌متر می‌رسد و بعد از آن با شیب تندتر افزایش می‌یابد و در ماه مه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. حداکثر مقدار تبخیر و تعرق در ماه مه تحت سناریوهای $RCP_{4.5}$ و $RCP_{8.5}$ به‌ترتیب ۱۵۳ و ١٦٢ میلی‌متر است. پس از ماه مه، با رسیدن به مراحل میانی و برداشت گندم آبی، تبخیر و تعرق روند کاهشی پیدا می‌کند و در ماه جولای به کمتر از ۳۰ میلی‌متر در ماه می‌رسد. از طرف دیگر نمودارها نشان می‌دهد که در هر دو سناریو، مقادیر تبخیر و تعرق در دوره‌های آینده در مقایسه با دورهٔ پایه افزایش پیدا خواهد کرد و این افزایش در آیندهٔ دور بیشتر از آیندهٔ نزدیک خواهد بود.



شکل ۱۲. نمودارهای میانگین ماهانهٔ تبخیر و تعرق گندم آبی در طول دورهٔ کشت تحت دو سناریو

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

شکل ۱۳ مجموع تبخیر و تعرق سالانهٔ گندم آبی را در مراحل رشد نشان می‌دهد. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق با مناطق کاشت گندم آبی در مناطق کوهستانی و پایکوهی زاگرس، آذربایجان، خراسان و کرمان مطابقت دارد. مقدار تبخیر و تعرق دورهٔ رشد در سطح کشور از ۳۳۰ تا ۹۷۱ میلی‌متر در دورهٔ پایه تا ۳٤۰ تا ۱۰۲۵ میلی‌متر در آیندهٔ دور تحت سناریوی RCP8.5 متفاوت است.



شکل ۱۳. تبخیر و تعرق دورهٔ رشد گندم آبی در دورهٔ پایه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰٦۰) و آیندهٔ دور (۲۰٦۱–۲۱۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بخش کشاورزی به‌دلیل ارتباط بسیار نزدیک با منابع طبیعی و شرایط آب‌وهوایی، تـأثیرات بسیاری را از تغییرات دما و بارندگی و درنتیجه، تغییر در آب در دسترس کشاورزی می‌پذیرد. در این پژوهش، تبخیر و تعرق دورهٔ رشد گندم آبی پاییزه در ایران در سه دورهٔ پایـه (۲۰۰۵–۲۰۲۰)، آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۶۰) و آیندهٔ دور (۲۰۶۱–۲۱۰۰) تحت دو سناریوی $RCP_{8.5}$ و $RCP_{4.5}$ محاسبه و بررسی شده است. مقادیر تبخیر و تعـرق گنـدم متـأثر از مراحـل رشـد گندم، شرایط دمایی و رطوبتی است. در دورهٔ سرد سال یعنی فصول پاییز و زمستان با وجـود بارش‌های مناسب، به‌دلیل پایین‌بودن دما، کمترین مقادیر تبخیر و تعرق اتفاق می‌افتد. وضعیت خاص سیستم‌های فشار و بارش در این فصول، تاریخ شروع کشت محصول را نیز متأثر مـی-کند. مراحل رشد گیاه یکی دیگر از عوامل اصلی مؤثر در تبخیر و تعرق است. تعـرق گیـاه در مرحلهٔ توسعهٔ ریشه‌ها و شروع رشد سبزینه‌ای خیلی کم است. در این مرحله، سهم زیـادی از تبخیر و تعرق به‌دلیل تبخیر از سطح خاک رخ می‌دهد. میزان آب مصرفی گیاه تا اوایل مرحلهٔ گل‌دادن رفته‌رفته افزایش می‌یابد و در اواسط مرحلهٔ گل‌دهی به حداکثر مـی‌رسـد. سـپس تـا مرحله برداشت، آب مصرفی گیاهان به‌تدریج کاهش می‌یابد.

بررسی نقشه‌های ماهانهٔ تبخیر و تعرق گندم آبی پاییزه در ایران نشان داد، کشت گندم ابتدا در بخش‌های شمال غرب و سپس جنوب غرب کشور در ماه اُکتبر آغاز می‌شود (روز شـروع براساس نقاط متفاوت است) و به‌تدریج در مـاه دسـامبر تمـام منـاطق بـه زیرکشـت مـی‌رود. به‌طورکلی، دورهٔ کشت گندم آبی در سراسر کشور از ۵ تا ۱۰ ماه متغیـر اسـت کـه البتـه ایـن دوره، تغییراتی براساس نقاط مختلف دارد. بررسی‌های ماهانه در طول دورهٔ کشت در هر سـه دورهٔ پایه، آیندهٔ نزدیک و آیندهٔ دور، نشانگر رخداد کمترین مقادیر تبخیر و تعرق در مـاه‌هـای آغازین کشت به‌دلیل نبود ارتفاع سبزینه‌ای است که به‌تدریج این مقدار طـی مـاه‌هـای بعـدی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به بیشترین حد در دورهٔ میانی کشت، روند تدریجی نزولی را طی می‌کند و در مرحلهٔ پایانی کشت دوباره به کمترین مقدار می‌رسد. به‌رغم شباهت در روند افزایش و کاهش مقادیر تبخیر و تعرق کشت گندم آبی که متأثر از عوامل مراحل رشد، شرایط دمایی و رطوبتی است، تفاوت آشکاری بین دوره‌های آینده و دورهٔ پایه از ماه ژانویـه بـه بعـد

تحت سناریوی RCP4.5 و از ماه دسامبر به بعد تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده می‌شود که این موضوع با نتایج مطالعات دیو و همکاران (۲۰۱۷، ص. ۳۳۸)، فلاح قالهری و همکاران (۱۳۹٤، ص. ۱) و علی‌حوری (۱۳۹٦، ص. ۳۲۹) مطابقت دارد. از نظر وضعیت تبخیر و تعرق در آینده، بررسی نقشه‌های دورهٔ پایه و دو دورهٔ آیندهٔ نزدیک و دور در ماه‌های مختلف دورهٔ کشت نشان داد، مقادیر تبخیر و تعرق در دو دورهٔ آیندهٔ نزدیک و دور در مقایسه با دورهٔ پایه افزایش خواهد یافت که این افزایش در سناریوی RCP8.5 به‌مراتب بیشتر از سناریوی RCP4.5 است؛ ازاین‌رو این افزایش بسیاری از برنامه‌ریزی‌های آینده را در زمینهٔ تأمین آب محصول به چالش خواهد کشید. مطالعات نیکبخت شهبازی (۱۳۹۷، ص. ۱۲٤)، یعقوب‌زاده، احمدی، برومندنسب و حقایقی مقدم (۱۳۹۵، ص. ۵۱۱) و حیدری تاشه‌کبود و خوشخو (۱۳۹۸، ص. ۱۵۷) نیز افزایش تبخیر و تعرق را در آینده به‌ویژه در آیندهٔ دور نشان داده‌اند. بیشترین و کمترین مقادیر تبخیر و تعرق گندم آبی در هر سه دورهٔ پایه، آیندهٔ نزدیک و آیندهٔ دور به‌ترتیب در ماه‌های مه و اُکتبر اتفاق می‌افتد؛ بنابراین ماه مه به‌عنوان ماه دارای بیشترین مقدار تبخیر و تعرق که در آینده افزایش بیشتری را نیز تجربه خواهد کرد، شایستهٔ توجه ویژه برای اجتناب از مشکلات احتمالی در طی دورهٔ رشد از نظر تأمین کسری آب محصول است.

پیشنهاد می‌شود که در آینده در زمینهٔ تاریخ آغاز کشت گندم آبی در شرایط تغییر اقلیم در هر منطقه مطالعات موردی مجزا انجام شود و طراحی تقویم زراعی به‌گونه‌ای باشد که مراحلی از رشد محصول که با تبخیر و تعرق زیاد همراه است، با بارش‌های فصلی تلاقی پیدا کند تا نیاز به آبیاری برای جبران تلفات آبِ ناشی از تبخیر و تعرق تا اندازه‌ای کاهش یابد. علاوه‌بر مطالعهٔ تقویم زراعی، مطالعه دربارهٔ واریته‌های مختلف گندم در هر منطقه متناسب با شرایط تغییر اقلیم می‌تواند بسیار سودمند باشد.

کتابنامه

۱. براتی، خ.، عابدی کوپایی، ج.، درویشی، ا.، آذری، آ.، و یوسفی، ع. (۱۳۹۷). برآورد نیاز خالص آبیاری گیاهان الگوی کشت دشت کرمانشاه و مقایسهٔ آن با داده‌های سند ملی آب. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۲(٤)، ٥٤۳–٥٥۳.

۲. براهیمی، م.، و غازی، ا. (۱۳۹۷). به‌روزرسانی و بازنگری سند ملی آب در دشت‌های قزوین و فومنات. *نشریهٔ علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۲(۲)، ۱۹۹–۲۰۹.

۳. حیدری تاشه‌کبود، ش.، و خوشخو، ی. (۱۳۹۸). تصویرسازی و پیش‌بینی تغییرات آتی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های فصلی و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای انتشار RCP. *نشریهٔ تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ٥۳، ۱٥۷–۱۷٦.

٤. دشتی، ق.، باقری، پ.، پیش‌بهار، ا.، و مجنونی، ا. (۱۳۹۷). ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق و عملکرد گندم دیم در شهرستان اهر. *نشریهٔ آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۲(۲)، ٤۰۹–٤۲۳.

٥. رحمانی، م.، جامی‌الاحمدی، م.، شهیدی، ع.، و هادی‌زاده ازغندی، م. (۱۳۹٤). تأثیر تغییر اقلیم بر طول مراحل رشد و نیاز آبی گندم و جو (مطالعهٔ موردی: دشت بیرجند). *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۷(٤)، ٤٤۳–٤٦۰.

٦. سپه‌وند، م. (۱۳۸۸). مقایسهٔ نیاز آبی، بهره‌وری آب و بهره‌وری اقتصادی آن در گندم و کلزا در غرب کشور در سال‌های پر باران. *مجلهٔ پژوهش آب ایران*، ۳(٤)، ٦۳–٦۸.

۷. سلمانی، ا.، و مجرد، ف. (۱۳۹۸). رابطهٔ متغیرهای آب‌وهوایی با مصرف برق و پیش‌بینی تقاضای برق با مدل‌های گردش عمومی جو در غرب کشور. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ٥۱(۲)، ۳۰۱–۳۱٥.

۸. سلمانی، ب.، زراءنژاد، م.، و کیانی، پ. (۱۳۹٦). مقایسهٔ مدل تصحیح خطا و رگرسیون فازی برای پیش‌بینی تولید ناخالص ملی در ایران. *فصل‌نامهٔ پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعهٔ پایدار)*، ۱۷(۲)، ۱۰۱–۱۲۰.

۹. سلیمانی نیادگانی، م .، پارسی‌نژاد، م.، عراقی‌نژاد، ش.، و مساح بوانی، ع. (۱۳۹۰). تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد گندم دیم (مطالعهٔ موردی: بهشهر). *نشریهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲٥(۲)، ۳۹۷–۳۸۹.

۱۰. شعبانی، ب.، موسوی بایگی، م.، و جباری نوقابی، م. (۱۳۹۵). پیش‌بینی تغییرات نیاز آبی برخی از محصولات کشاورزی دشت مشهد ناشی از تغییرات دمای هوا. *علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹*(۲)، ۱– ۱۳.

۱۱. شمسی‌پور، ع. (۱۳۹۳). *مدل‌سازی آب‌وهوایی، نظریه و روش* (چاپ دوم). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۱۲. صداقت، م. (۱۳۹۰). *منابع و مسائل آب ایران* (چاپ نهم). تهران: انتشارات دانشگاه پیام‌نور.

۱۳. عظیمی دزفولی، س. ع. ا.، رکن‌الدین افتخاری، ع.، هایدج، ا.، نظامی‌پور، ق.، نظری، ب.، فرج‌زاده، م.، کاظم‌نژاد، م.، و فهمی، ه. (۱۳۹٦). برآورد تحلیلی آب مورد نیاز تولید گندم در ایران. *برنامه- ریزی و آمایش فضا، ۲۱*(۲)، ۱۵۳–۱۳۱.

۱٤. علی‌حوری، م. (۱۳۹٦). تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی خرما در مرحلهٔ رشد رویشی با استفاده از لایسیمتر. *پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱*(۳)، ۳۲۹–۳٤۰.

۱۵. عینی نرگسه، ح.، دیهیم‌فرد، ر.، صوفی‌زاده، س.، حقیقت، م.، و نوری، ا. (۱۳۹٤). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی استان فارس با استفاده از مدل APSIM. *تولید گیاهان زراعی، ۸*(٤)، ۲۰۳–۲۲٤.

۱٦. فرهادی بانسوله، ب.، اسدی، آ.، و حافظ‌پرست، م. (۱۳۹٦). تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل ذرت و جو در استان کرمانشاه در شرایط تغییر اقلیم. *نشریهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲٤*(۳) ۱۸۵–۲۰۲.

۱۷. فلاح قالهری، غ.، باعقیده، م.، و رضایی، ح. (۱۳۹۵). برآورد نیاز آبی محصول سیب زمینی در اقلیم تربت حیدریه و تخمین تبخیر و تعرق واقعی بر اساس تبخیر و تعرق مرجع. *فصل‌نامهٔ انسان و محیط زیست، ۱٤*(۲)، ٦۰–٤۹.

۱۸. فلاح قالهری، غ.، راه‌چمنی، م.، و بیرانوند، ف. (۱۳۹٤). برآورد نیاز آبی گیاه کنجد در اقلیم سبزوار. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ٦(۲۱)، ۱–۱٤.

۱۹. قدیریان، ا.، همامی، م.، و سفیانیان، ع. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات کمّی و کیفی زیستگاه سنجاب ایرانی در جنگل‌های استان لرستان تا سال ۲۰۵۰ بر اساس مدل اقلیمی CCSM4. *فصل‌نامهٔ علمی پژوهشی محیط زیست جانوری، ۱۰*(٤)، ۱۲۹–۱۳٦.

۲۰. مجرد، ف.، قمرنیا، ه.، و نصیری، ش. (۱۳۸٤). برآورد بارش مؤثر و نیاز آبی برای کشت برنج در جلگه مازندران. *پژوهش‌های جغرافیایی، ٥٤*، ٥۹–٧٦.

۲۱. مجیدی، ن.، علیزاده، ا.، و قربانی، م. (۱۳۹۰). تعیین الگوی کشت بهینهٔ همسو با مدیریت منابع آب دشت مشهد–چناران. *نشریهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، *۲۵*(٤)، ۷۷٦– ۷۸۵.
۲۲. محمدی، ا.، موحدی، س.، محمدی، ر.، و گلگاری، ص. (۱۳۹۹). بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر فنولوژی و عملکرد گندم دیم در منطقهٔ غرب و شمال غرب ایران. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، *٤۳*، ۱۷۰–۱۵۹.
۲۳. مدیری، ا. (۱۳۹۷). برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET0) در ایستگاه‌های سینوپتیک استان تهران. *فصل‌نامهٔ انسان و محیط زیست*، *۱٦*(۳)، ۱۲۵–۱۳٤.
۲٤. مرادی، ف.، کمالی، غ.، و وظیفه‌دوست، م. (۱۳۹٤). ارزیابی محصول تبخیر و تعرق پتانسیل از سنجندهٔ MODIS با استفاده از آمار ایستگاه‌های همدیدی در استان زنجان. *پژوهش‌های اقلیم-شناسی*، *۲۳*، ۳۹–٤۸.
۲۵. معصوم‌پور سماکوش، ج.، میری، م.، و پورکمر، ف. (۱۳۹٦) ارزیابی داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایران. *مجلهٔ ژئوفیزیک ایران*، *۱۱*(٤)، ٤۰–۵۳.
۲٦. میرموسوی، س. ح.، پناهی، ح.، اکبری، ح.، و اکبرزاده، ی. (۱۳۹۱). واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET0) و محاسبهٔ نیاز آبی گیاه (ETC) زیتون در استان کرمانشاه. *جغرافیا و پایداری محیط*، *۲*(۲)، ٦٤–٤۵.
۲۷. نیکبخت شهبازی، ع. (۱۳۹۷). بررسی میزان تغییرات بارش و تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی در استان خوزستان تحت تأثیر تغییر اقلیم. *نشریهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، *۲۵*(٦)، ۱۲۳–۱۳۹.
۲۸. یارمحمدی، س.، ذاکری‌نیا، م.، قربانی، خ.، و سلطانی، ا. (۱۳۹٦). بررسی اثر تغییراقلیم بر تبخیر–تعرق و نیاز آبی گندم در منطقهٔ بجنورد. *مجلهٔ مهندسی منابع آب*، *۱۰*(۳۵)، ۹۷–۱۰۹.
۲۹. یدالهی، پ. (۱۳۹۲). *بررسی رقابت تراکم‌های مختلف یولاف وحشی بر روی خصوصیات کمی و کیفی گندم*. پایان‌نامهٔ منتشرنشدهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ زراعت، دانشگاه زابل، ایران.
۳۰. یعقوب‌زاده، م.، احمدی، م.، برومندنسب، س.، و حقایقی مقدم، ا. (۱۳۹۵). اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر و تعرق در طی دورهٔ رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. *نشریهٔ پژوهش آب در کشاورزی*، *۳۰*(٤) ۵۱۱–۵۲۳.

31. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO

Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome. Retrieved from https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm.

32. Deo, K., Mishra, S. R., Singh, A. K., Mishra, A. N., & Singh, A. (2017). Water requirement of wheat crop for optimum production using CROPWAT model. *Journal of Medicinal Plants Studies*, *5*(3), 338-342.
33. Fares, A., Awal, R., Fares, S., Johnson, A. B., & Valenzuela, H. (2016). Irrigation water requirements for seed corn and coffee under potential climate change scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, *7*(1), 39-51.
34. Lazzara, P., & Rana, G. (2010). *The Crop coefficient (Kc) values of the major crops grown under Mediterranean climate.* Mediterranean Dialogue on Integrated Water Management. CRA- Research Unit for Agricultural in Dry Environments, via C. Ulpiani, 5, 70125 Bari, Italy.
35. Shahid, S. (2011). Impact of climate change on irrigation water demand of dry season boro rice in Northwest Bangladesh. *Climatic Change*, *105*(3-4), 433–453.
36. Suryadi, E., Ruswandi, D., Dwiratna, S., & Prawiranegara, B. M. P. (2019). Crop water requirements analysis using cropwat 8.0 software in maize intercropping with rice and soybean. *International Journal on Advanced Science, Engineering Information Technology*, *9*(4), 1364-1370.
37. Xing; W., Wang, W., Shao, Q., & Ding, Y. (2018). Estimating net irrigation requirements of winter wheat across Central-Eastern China under present and future climate scenarios. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *144*(7), 1-18.
38. Zhang, Y., Li, G., Ge, J., Li, Y., Yu, Z., & Niu, H., (2019). SC-PDSI is more sensitive to precipitation than to reference evapotranspiration in china during the time period 1951–2015. *Ecological Indicators*, *96*, 448-457.
39. Zhang, Y., Wang, Y., & Niu, H. (2017). Spatio-temporal variations in the areas suitable for the cultivation of rice and maize in China under future climate scenarios. *Science of the Total Environment*, *601–602*, 518–531.